

УДК 621.311.22

Эмпирическое обеспечение математической модели деаэрации воды в центробежно-вихревых деаэраторах¹

Г.В. Ледуховский, А.Н. Росляков, В.Н. Виноградов, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известен метод определения межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах, а также созданная на его основе математическая модель деаэрации воды. Для обеспечения практического использования модели необходимо разработать эмпирическое обеспечение, позволяющее рассчитывать коэффициент массопередачи при десорбции растворенного кислорода.

Методы и материалы: Используются методы экспериментальных исследований, теории подобия процессов теплообмена и математической статистики. Экспериментальные исследования реализованы в условиях промышленной эксплуатации ДЦВ в котельной производственного объединения «Иртыш» (г. Омск). В качестве объекта исследования использован деаэратор номинальной производительностью 200 т/ч, работающий под вакуумом в режиме перегретой воды (без подачи греющего пара) в составе двухступенчатой установки.

Результаты: На основе результатов экспериментальных исследований разработано эмпирическое обеспечение математической модели процесса деаэрации воды в центробежно-вихревом деаэраторе в виде критериального уравнения, обеспечивающего расчет коэффициента массопередачи по растворенному кислороду в различных режимах работы.

Выводы: Разработанное эмпирическое обеспечение ячеечной модели деаэрации обеспечивает возможность постановки и решения практически значимых для энергетики расчетных задач оптимизации конструктивного исполнения и режимов работы центробежно-вихревых деаэраторов.

Ключевые слова: деаэрация, десорбция, теплообмен, центробежно-вихревой деаэратор, математическая модель, теория подобия, регрессия, математическая статистика, критериальное уравнение.

Empirical support for the mathematical model of water deaeration in the centrifugal-vortex deaerators

G.V. Leduhovsky, A.N. Roslyakov, V.N. Vinogradov, V.P. Zhukov, E.V. Barochkin,
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: The superheated liquid interphase surface determination method in the centrifugal-vortex deaerators as well as the water deaeration mathematical model created on its basis are well known. However, the model practical application requires development of empirical support in order to calculate the mass transfer coefficient of dissolved oxygen under desorption.

Materials and methods: The study employed methods of experimental studies, the theory of heat and mass transfer similarity and mathematical statistics. The experimental studies were conducted in commercial operation conditions in the boiler room of Production Association "Irtys" (Omsk City). The object of the study was a 200 tph rated capacity vacuum deaerator working in superheated water mode (without heating steam supply) as part of a two-stage unit.

Results: Based on the results of experimental studies, the authors developed empirical support for the mathematical model of water deaeration in the centrifugal-vortex deaerator as a criterion equation enabling calculation of the mass transfer coefficient by the dissolved oxygen in various operation modes.

Conclusions: The developed empirical support of the deaeration cell model allows the formulation and solution of practically important calculation problems of design and operation mode optimization of centrifugal-vortex deaerators.

Key words: deaeration, desorption, heat and mass transfer, centrifugal vortex deaerator, mathematical model, similarity theory, regression, mathematical statistics, criterion equation.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.005-010

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-08-01684).

В настоящее время в технологических схемах энергетических установок наряду с традиционными струйно-барботажными деаэраторами воды применяются аппараты других конструкций [1, 2]. Существенное распространение получили центробежно-вихревые деаэраторы (ДЦВ), принципиальные конструкции которых для работы с подачей греющего пара и в режиме перегретой воды разработаны Б.А. Зиминим [3]. Принцип действия деаэратора, работающего без подачи греющего пара, рассмотрим на примере аппарата, конструктивная схема которого приведена на рис. 1. ДЦВ состоит из корпуса 1, встроенного в центробежный сепаратор 2. Через центральное отверстие в верхней крышке 3 корпуса 1 проходит трубопровод отвода пара 4. В части корпуса 1, встроенной в центробежный сепаратор 2, имеются окна 5, расположенные над нижней торцевой крышкой корпуса 6. Направляемая на деаэрацию вода, перегретая относительно температуры насыщения при давлении в паровом пространстве деаэратора, подается через тангенциальные подводящие патрубки 7. Благодаря тангенциальному подводу, поток воды приобретает вращательное движение внутри корпуса. Для организации вихревого течения воды имеется кольцевая перегородка 8, разделяющая входной и выходной отсеки корпуса 1. Из выходного отсека через окна 5 вода поступает в сепаратор 2. Отвод воды из сепаратора осуществляется через тангенциальные патрубки 9.

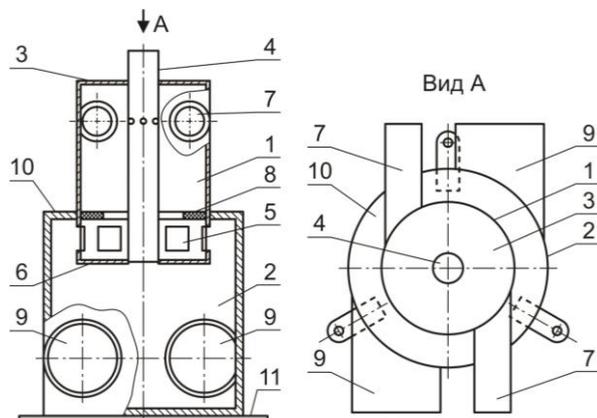


Рис. 1. Конструктивная схема ДЦВ, работающего без подачи греющего пара: 1 – корпус; 2 – центробежный сепаратор; 3 и 6 – верхняя и нижняя торцевые крышки корпуса соответственно; 4 – трубопровод отвода пара; 5 – окна для отвода воды из корпуса; 7 и 9 – подводящие и отводящие тангенциальные патрубки соответственно; 8 – кольцевая перегородка (шайба); 10 и 11 – верхняя и нижняя торцевые крышки центробежного сепаратора соответственно

Согласно представлениям автора конструкции [3], вращательное движение деаэрируемой воды обеспечивает вскипание той части вращающегося потока, которая ближе к оси вращения. Давление воды в потоке уменьшается по мере уменьшения радиуса вращения, в результате чего вода вскипает мельчайшими пузырьками, абсорбирующими растворенные газы. Паро-

газовые пузырьки вытесняются за границу раздела фаз по принципу центробежной сепарации.

ДЦВ способен работать при любом давлении выпара, т. е. использоваться в качестве деаэратора вакуумного, атмосферного или повышенного давления. Работа в вакуумном режиме требует установки соответствующего воздухоудаляющего устройства. Наиболее привлекательным с точки зрения удобства эксплуатации является вариант работы ДЦВ в режиме перегретой воды. В этом случае не требуется подвод греющего теплоносителя, что упрощает конструктивную схему установки и эксплуатацию оборудования. Однако при этом ДЦВ становится прямоточным деаэратором с малым временем пребывания воды, из-за чего необходима организация второй ступени деаэрации.

Прямоточность деаэратора не является существенной помехой для реализации эффективной деаэрации воды. Термодинамические расчеты показывают, что преимущество противоточного деаэратора перед прямоточным невелико [1]. Эффективность прямоточной деаэрации достижима конструктивным путем, например установкой капельных деаэрационных устройств (КДУ) в паровом объеме деаэраторного бака. В этом случае деаэрируемая вода подается в ДЦВ, далее поступает в КДУ, откуда сливается в деаэраторный бак. Трубопроводы выпара ДЦВ и КДУ могут быть объединены; необходимые доли выпара из ДЦВ и КДУ обеспечиваются подбором соответствующих диаметров трубопроводов выпара. Разбрызгивание воды в КДУ происходит под действием избыточного давления воды, создаваемого за счет разности геометрических высот между выходным патрубком ДЦВ и входным патрубком КДУ, а также за счет разности давлений пара в ДЦВ и над поверхностью воды в деаэраторном баке и небольшого динамического напора, создаваемого в ДЦВ.

Преимуществами ДЦВ являются его сравнительно малые габариты и металлоемкость, а также широкий рабочий диапазон изменения производительности (от 20 до 120 %). Опыт использования таких деаэраторов (к настоящему времени в России установлено более ста аппаратов) показывает, что последовательная установка ДЦВ и КДУ обеспечивает получение воды с концентрацией растворенного кислорода в деаэрированной воде от 5 до 30 мкг/дм³ при отсутствии свободного диоксида углерода.

Удельный расход выпара ДЦВ варьируется в диапазоне от 10 до 20 килограмм на тонну деаэрированной воды, что примерно на порядок больше, чем для струйно-барботажных деаэраторов. Повышенный расход выпара является недостатком ДЦВ, так как требует установки, например, смешивающего охладителя выпара с возвратом конденсата выпара в деаэратор.

Несмотря на существенное распространение деаэраторов рассматриваемого типа, в настоящее время выбор их типоразмеров и техно-

логических режимов осуществляется исключительно на основе обобщения опыта эксплуатации существующих установок или экспериментальных исследований. Последнее связано с существенными затратами ресурсов. Адекватные математические модели процесса деаэрации воды в ДЦВ отсутствуют. В связи с этим проведение теоретических исследований процессов теплообмена в центробежно-вихревых деаэраторах в целях определения оптимальных конструкций и эффективных режимов их эксплуатации является актуальным. Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденным указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011.

Нами разрабатывается математическая модель процесса деаэрации воды в деаэраторах центробежно-вихревого типа. В основу модели положено раздельное определение площади межфазной поверхности и коэффициентов переноса, что открывает новые возможности для оптимального управления совмещенными процессами тепло- и массопереноса. Площадь поверхности раздела фаз рассчитывается на основе комбинаторного подхода [4]. Модель деаэрации воды базируется на известных уравнениях массообменных (диффузионных) процессов [5].

Таким образом, получена модель деаэрации воды в центробежно-вихревом деаэраторе, включающая только один параметр идентификации – коэффициент массопередачи по растворенному газу, в данном случае – по растворенному кислороду. Для обеспечения возможности практического использования модели необходима разработка эмпирического обеспечения, позволяющего рассчитывать коэффициент массопереноса при десорбции растворенного кислорода в различных режимах работы деаэратора.

В рамках проведенной работы сформулированы и решены следующие задачи:

1) проведены экспериментальные исследования процесса деаэрации воды в деаэраторе центробежно-вихревого типа;

2) для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели деаэрации воды;

3) на основе экспериментальных данных и результатов идентификации модели составлено критериальное уравнение, обеспечивающее расчет значений коэффициента массопереноса по растворенному кислороду.

Экспериментальные исследования реализованы в условиях промышленной эксплуатации ДЦВ в котельной производственного объединения «Иртыш» (г. Омск). Объектом исследований являлся деаэратор номинальной производительностью 200 т/ч, работающий под вакуумом в режиме перегретой воды (без подачи греющего пара) в составе двухступенчатой установки (ДЦВ – первая ступень, КДУ в деаэраторном баке – вторая ступень). Разрежение в трубопроводе отсоса

выпара создается водоструйным эжектором; имеется смешивающий охладитель выпара.

Испытания проведены методом активного эксперимента. В каждом из 19 опытов, реализованных при различных значениях гидравлической нагрузки деаэратора, температуры воды перед ним, давлении в трубопроводе отсоса выпара и массовой концентрации растворенного кислорода перед деаэратором, выполнено от пяти до семи замеров контролируемых параметров. В объем теплотехнического контроля включены измерения расхода воды в деаэратор, температуры и давления воды до и после деаэратора, давления в паровом пространстве деаэратора и в трубопроводе отсоса выпара, а также атмосферного давления. Используются преимущественно образцовые и лабораторные средства измерения. Массовая концентрация растворенного кислорода в потоках воды до и после деаэратора измерялась амперометрическим методом. Полученные результаты замеров контролируемых параметров подвергнуты первичной обработке, включающей отсев выбегов, учет известных систематических погрешностей, а также расчет окончательных результатов измерения контролируемых параметров.

При использовании полученных таким образом экспериментальных данных для условий каждого опыта выполнена идентификация математической модели деаэрации воды, в ходе которой площадь межфазной поверхности рассчитана предложенным ранее методом [4], а значения единственного параметра идентификации модели – коэффициента массопереноса по растворенному кислороду – определялись по условию минимального рассогласования результатов расчета и результатов измерения массовой концентрации растворенного кислорода в воде после деаэратора. Сводные данные по основным параметрам потоков теплоносителей в опытах и найденным значениям параметра идентификации модели приведены в табл. 1.

Рассмотрим этапы разработки критериального уравнения, обеспечивающего расчет значений коэффициента массопередачи по растворенному кислороду.

Формулировка задачи. С.С. Кутателадзе теоретически получено [6] обобщенное критериальное уравнение, характеризующее деаэрацию воды в условиях работы барботажного устройства (или в общем случае – для системы «жидкость, близкая к состоянию насыщения – пар»):

$$\frac{C_2 - C^*}{C_1 - C^*} = f \left(Fr_6; \frac{\rho_n}{\rho_{ж}}; \frac{G_{ж}}{G_n}; \frac{\sigma}{g \rho_{ж} h_0^2}; \frac{\rho}{g \rho_{ж} h_0} \right), \quad (1)$$

где C_2 и C_1 – массовые концентрации растворенного кислорода на выходе и входе устройства соответственно, мг/дм³; C^* – массовая равновесная концентрация растворенного кислорода, мг/дм³; Fr_6 – критерий Фруда для барботажного устройства; ρ_n и $\rho_{ж}$ – плотности пара и воды соответственно, кг/м³; $G_{ж}$ и G_n – массовые расходы

воды и пара соответственно на входе в барботажное устройство, кг/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м; p – абсолютное давление пара на входе, Па; h_0 – гидростатический уровень воды в барботажном устройстве, м.

Для рассматриваемых в нашем случае условий центробежно-вихревой деаэрации воды необходимо сделать несколько замечаний:

1. Согласно поставленной цели, требуется определять не отношение разностей концентраций газа в воде и паре, используемое в выражении (1), а непосредственно коэффициент массопередачи. В этом случае будем использовать критерий Шервуда как безразмерную характеристику интенсивности процесса газообмена:

$$Sh = \frac{k_m d}{D_{ж} \rho_{ж}}, \quad (2)$$

где k_m – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду, кг/(м²с); d – определяющий размер, в качестве которого выбран диаметр корпуса центробежно-вихревой зоны деаэратора, м; $D_{ж}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде, м²/с.

2. Критерий Фруда для барботажного устройства является мерой соотношения скорости пара и потенциальной скорости воды в отверстиях барботажного листа. Для центробежного течения критерий Фруда может быть рассчитан как [7]

$$Fr = \frac{\omega^2 d}{2g}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость потока жидкости, 1/с.

3. Отношение расходов теплоносителей $G_{ж} / G_{п}$ для деаэратора, работающего в режиме перегретой воды, однозначно определяется критерием Кутателадзе, рассчитываемым по выражению [7]

$$K = \frac{r}{c \Delta T}, \quad (4)$$

где r – удельная теплота парообразования; c – удельная теплоемкость воды; ΔT – перегрев воды относительно температуры насыщения при давлении в деаэраторе.

4. В соответствии с выводами, сделанными С.С. Кутателадзе [6], влияние факторов

$$\left(\frac{\sigma}{g \rho_{ж} h_0^2} \right) \text{ и } \left(\frac{p}{g \rho_{ж} h_0} \right)$$

становится заметным только при существенных изменениях давления, например, при переходе от деаэраторов атмосферного типа к деаэраторам повышенного давления. Ранее нами также установлено отсутствие связи этих факторов с функцией отклика для условий барботажной деаэрации воды при малом изменении давления [8]. В соответствии с этими выводами, исключим рассматриваемые факторы из уравнения регрессии.

Таким образом, будем искать расчетное критериальное уравнение в следующем виде:

$$Sh = f \left(Fr; \frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}}; K \right). \quad (5)$$

Определяющими параметрами при расчете теплофизических параметров являются средняя температура воды в деаэраторе и абсолютное давление в нем.

Таблица 1. Основные условия опытов и результаты идентификации математической модели деаэрации воды

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номер опыта										
Расход воды на входе, т/ч	120	160	121	119	62	61	120	120	82	81
Температура воды на входе, °С	88,76	90,95	91,70	65,90	65,10	71,60	89,60	88,53	89,10	90,50
Температура воды на выходе, °С	87,88	89,95	90,62	64,10	64,83	70,45	88,96	87,40	87,90	88,40
Абсолютное давление в деаэраторе, бар	0,740	0,822	0,791	0,579	0,518	0,434	0,774	0,707	0,617	0,657
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе, мкг/дм ³	3710	4100	3920	6405	4940	4475	3915	3608	3730	3890
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на выходе, мкг/дм ³	2040	2435	1755	4610	3130	4015	1915	1900	750	750
Коэффициент массопередачи по результатам идентификации модели, мкг/(м ² с)	60,3	60,3	50,2	45,2	150,6	5,0	75,3	50,2	50,2	30,1

Наименование показателя, единица измерения	Значение показателя									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Номер опыта										
Расход воды на входе, т/ч	82	124	63	63	63	59	118	128	122	
Температура воды на входе, °С	87,80	88,30	87,30	88,10	89,70	91,67	88,90	87,95	89,05	
Температура воды на выходе, °С	86,80	85,95	84,30	85,10	89,00	90,17	87,75	86,60	87,75	
Абсолютное давление в деаэраторе, бар	0,716	0,618	0,578	0,602	0,704	0,789	0,706	0,643	0,692	
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на входе, мкг/дм ³	3350	3630	3480	3320	3760	3250	3300	3690	3995	
Массовая концентрация растворенного кислорода в воде на выходе, мкг/дм ³	1545	610	563	580	1125	1848	1870	1555	1615	
Коэффициент массопередачи по результатам идентификации модели, мкг/(м ² с)	40,2	45,2	22,6	22,6	70,3	15,1	50,2	62,8	55,2	

Спецификация модели. Искомое уравнение регрессии, согласно рекомендациям [6], запишем в мультипликативном виде:

$$Sh = m_0 Fr^{m_1} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{m_2} K^{m_3}, \quad (6)$$

где $m_0 \dots m_3$ – параметры идентификации.

Выполним корреляционный анализ для имеющегося массива экспериментальных данных (табл. 1) с использованием аппарата для множественной линейной регрессии [9, 10] (исходное уравнение (6) предварительно прологарифмируем). Матрица коэффициентов парной корреляции приведена в виде табл. 2.

Таблица 2. Матрица коэффициентов парной корреляции

Факторы / функция отклика	$\ln(Sh)$	$\ln(Fr)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	$\ln(K)$
$\ln(Sh)$	1	0,70 [4,0; 2,1]	0,46 [2,1; 2,1]	0,60 [3,1; 2,1]
$\ln(Fr)$	0,70 [4,0; 2,1]	1	0,73 [4,4; 2,1]	0,01 [0,1; 2,1]
$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	0,46 [2,1; 2,1]	0,73 [4,4; 2,1]	1	0,05 [0,2; 2,1]
$\ln(K)$	0,60 [3,1; 2,1]	0,01 [0,1; 2,1]	0,05 [0,2; 2,1]	1

Примечание. В квадратных скобках через точку с запятой указаны показатели значимости коэффициентов парной корреляции: значение критерия Стьюдента; критическое значение критерия Стьюдента.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Теснота связи фактора $\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$ с функцией отклика может быть охарактеризована как неясная (критерий Стьюдента находится на уровне меньше критического значения). Кроме того, рассматриваемый фактор и фактор $\ln(Fr)$, судя по значению межфакторного коэффициента парной корреляции 0,73, должны быть коллинеарными. Анализ данных позволяет заключить, что эта связь обусловлена технологическими особенностями процесса – чем больше значение критерия Фруда (больше угловая скорость потока, т. е. больше расход воды в деаэратор), больше гидравлическое сопротивление аппарата, тем больше при прочих равных условиях абсолютное давление в нем и тем больше отношение плотностей теплоносителей. Однако исключать эти факторы из рассмотрения на этом этапе преждевременно (целесообразность такого решения будет доказана далее при анализе значимости коэффициентов регрессии итогового уравнения).

2. Факторы $\ln(K)$ и $\ln(Fr)$ тесно связаны с функцией отклика, на что указывают значения коэффициента парной корреляции 0,7 и 0,6. Коллинеарность фактора $\ln(K)$ с факторами $\ln(Fr)$ и $\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$ не выявлена: коэффициенты парной корреляции близки к нулю.

2. Факторы $\ln(K)$ и $\ln(Fr)$ тесно связаны с функцией отклика, на что указывают значения коэффициента парной корреляции 0,7 и 0,6. Коллинеарность фактора $\ln(K)$ с факторами $\ln(Fr)$ и $\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$ не выявлена: коэффициенты парной корреляции близки к нулю.

Идентификация уравнения регрессии.

Искомые параметры идентификации m_0 , m_1 , m_2 и m_3 уравнения регрессии (6) после его логарифмирования определены методом наименьших квадратов. В результате искомое уравнение регрессии получено в виде

$$Sh = 2,331 \cdot 10^{-15} Fr^{0,526} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{-2,832} K^{0,783}. \quad (7)$$

На рис. 2 выполнено сопоставление рассчитанных по уравнению (7) и экспериментальных значений критерия Шервуда.

Оценка качества регрессии и существенности факторов. Множественное корреляционное отношение для уравнения регрессии (7) составляет $R = 0,996$, а скорректированное значение этого показателя (с учетом поправки на число степеней свободы) равно $\bar{R} = 0,995$. Показатели значимости уравнения (7):

– доказательство с использованием критерия Фишера: значение критерия Фишера составило 107,2; критическое значение 2,4 (уровень значимости принят равным 0,95);

– доказательство с использованием критерия Стьюдента: значение критерия Стьюдента получено на уровне 496,1 при критическом значении 2,1.

Статистическую значимость каждого из включенных в уравнение факторов выполним с использованием критерия Стьюдента и частных критериев Фишера. Результаты проверки приведены в табл. 3. Полученные результаты доказывают, что влияние на функцию отклика каждого из рассматриваемых факторов является статистически значимым.

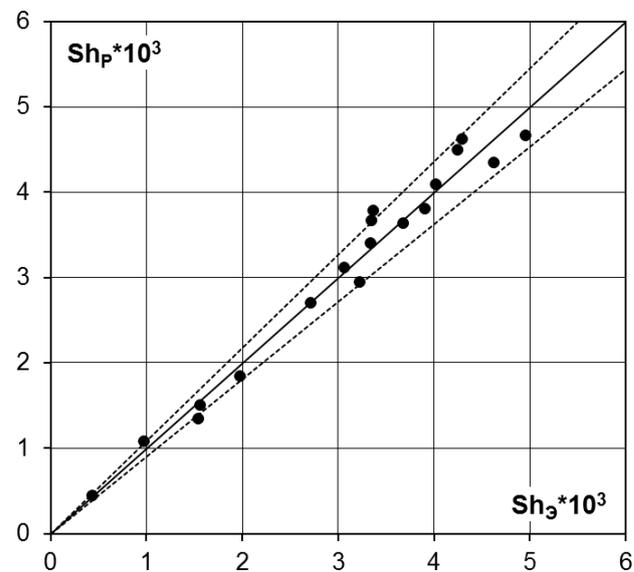


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений критерия Шервуда: $Sh_э$ и $Sh_р$ – экспериментальные и расчетные значения критерия Шервуда соответственно; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений; пунктирные линии – границы 95 %-го доверительного интервала, обусловленного погрешностью измерения параметров в условиях опытов; точки – результаты расчета по уравнению регрессии (7)

Таблица 3. Результаты оценки статистической значимости факторов

Показатель	Значение для факторов		
	$\ln(Fr)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_j}\right)$	$\ln(K)$
Частный критерий корреляции при исключении фактора	0,992	0,996	0,994
Критерий Стьюдента для частного критерия корреляции при исключении фактора (критическое значение)	279,6 (2,46)	506,8 (2,46)	349,4 (2,46)
Частный критерий Фишера (критическое значение)	1046,6 (4,5)	1903,3 (4,5)	1309,8 (4,5)

Исследование остатков. Сумма остатков ε , определенных как разность между экспериментальными и расчетными значениями критерия Шервуда, в опытах составила менее 1,6 % от среднего наблюдаемого значения критерия Шервуда. Проверка остатков на принадлежность нормальному распределению не выполнялась из-за малости выборки. При анализе зависимостей ε от каждого из факторов тенденций не выявлено.

Полученное критериальное уравнение (7) обеспечивает расчет коэффициента массопередачи по растворенному кислороду в центробежно-вихревом деаэраторе, работающем под вакуумом в режиме перегретой воды. Погрешность расчетного определения коэффициента массопередачи при этом составила 6,5 %, что можно признать удовлетворительным. Предложенное уравнение справедливо при изменении факторов в следующих диапазонах: критерия Фруда – от 3,5 до 25,5; критерия Кутателадзе – от 180 до 2075; отношения плотности сухого насыщенного пара при давлении в деаэраторе к плотности воды при том же давлении и средней температуре воды в деаэраторе – от $2,7 \cdot 10^4$ до $5,1 \cdot 10^4$.

Список литературы

1. Шаратов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с.
2. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
3. Пат. 2131555 Российская Федерация F22D1/50, C02F1/20, B01D19/00. Деаэратор / Зимин Б.А.; заявитель и патентообладатель Зимин Б.А. – № 97121266/06; заявл. 09.12.1997; опубл. 10.06.1999, Бюл. № 22 (I ч.). – 4 с.

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Росляков Антон Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

4. Комбинаторный подход к моделированию формирования межфазной поверхности в перегретой жидкости в центробежно-вихревых деаэраторах / А.Н. Росляков, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – вып. 5. – С. 64-69.

5. Жуков В.П., Цюра Д.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

6. Кутателадзе С.С., Зысин В.А. Нагрев и деаэрация воды при непосредственном смешении ее с паром // За новое советское энергооборудование. – Л., 1939. – С. 86–124.

7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

8. Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках с затопленным барботажным устройством / С.Д. Горшенин, А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 9–13.

9. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

10. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 352 с.

References

1. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'janovsk, UGTU, 2003. 560 p.
2. Olikier, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal water deaeration in industrial heating plants and heat networks]. Leningrad, Stroyizdat, 1972. 137 p.
3. Zimin, B.A. *Deaerator* [Deaerator]. Patent RF, no. 2131555, 1999.
4. Roslyakov, A.N., Zhukov, V.P., Leduhovsky, G.V., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 64-69.
5. Zhukov, V.P., Tsyura, D.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of heat and mass exchange installations]. Ivanovo, 2009. 176 p.
6. Kutateladze, S.S., Zysin, V.A. *Nagrev i deaeratsiya vody pri neposredstvennom smeshenii ee s parom* [Heating and degassing of water through its direct mixing with steam]. *Za novoe sovetskoe energooborudovanie* [For the new Soviet power equipment]. Leningrad, 1939, pp. 86–124.
7. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1971. 784 p.
8. Gorshenin, S.D., Nenaezdnikov, A.Yu., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 9–13.
9. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz v 2 kn., kn. 1* [Applied Regression Analysis in 2 books, book 1]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 366 p.
10. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz v 2 kn., kn. 2* [Applied Regression Analysis in 2 books, book 2]. Moscow, Finansy i statistika, 1986. 352 p.

Виноградов Владимир Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,
телефон (4932) 38-57-83,
e-mail: V.N.Vinogradov@mail.ru

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, заведующий кафедрой прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru